

不同运动模式下健康男性足底受力特征分析

丁皓¹ 张延海² 聂智超² 郭潘靖² 王多多² 庄逸² 吕杰^{1,3,4}¹上海健康医学院医疗器械学院, 上海 201318; ²上海理工大学健康科学与工程学院, 上海 200093; ³上海健康医学院中国医疗器械政策研究与安全评价中心, 上海 201318; ⁴上海健康医学院穿戴式医疗技术与器械工程研究中心, 上海 201318

通信作者: 吕杰, Email: lvj@sumhs.edu.cn

【摘要】 目的 探索不同运动模式下足底压力的受力特征, 为步态识别和运动康复提供理论支持。
方法 采用 F-scan 鞋垫式足底压力测量系统采集 10 例健康男性裸足状态下不同运动模式(慢走、正常行走、奔跑、双脚跳跃、单脚跳跃)的足底受力数据, 本研究均使用受试者的右足数据作为研究对象。采用 Python 和 Excel 2010 版数据分析软件处理本研究所得数据, 分析足底受到的垂直压力、足底压强峰值、足底压力分布区域以及压力中心轨迹等。**结果** 对比不同运动模式, 慢走、正常行走、奔跑时, 运动速率越快则压力中心轨迹变化越快, 正常行走和慢走所受垂直力为体重的 1.6 倍, 而奔跑则达到了体重的 6 倍; 双脚跳跃时压力中心轨迹变化剧烈, 单脚跳跃时的足底压强峰值最大。所有运动受力区域几乎都集中在足跟与前脚掌, 脚趾中仅拇趾有明显受力。**结论** 不同运动模式下, 足底受力的各项指标均有各自的特征。奔跑运动时, 足底所受垂直地面反作用力的差异最为显著, 足内侧至足外侧的 COP 轨迹变化较为平稳; 单脚跳跃和双脚跳跃时, 垂直地面反作用力波形均有一定的起伏, 呈现出“M”型双峰, 双脚跳跃时, 足跟侧至足趾侧的 COP 轨迹变化剧烈, 单脚跳跃足底压强峰值的平均值最大, 这些特征可为步态识别和运动康复等研究提供参考。

【关键词】 足底受力; 运动模式; 速率; 方式; 特征**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(81574096); 上海健康医学院高水平地方高校建设项目(E1-2602-21-201006-1)**Funding:** National Natural Science Foundation of China(81574096); SUMHS High-Level Local University Construction Project(E1-2602-21-201006-1)

DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2021.11.014

有研究表明, 受生理条件、个人职业、运动方式等影响, 人体在运动过程中的足底压力差异显著^[1-4]。从事强体力劳动的职工和篮球、足球、跑步等职业运动员, 其下肢长期承受巨大冲击, 可引发膝关节和踝关节损伤, 不仅不容易康复, 且易反复发作。因此了解不同运动对于足底压力的影响, 对下肢关节、骨骼、肌肉、韧带等损伤和康复研究的发展具有积极的作用。另一方面, 人在运动过程中, 足底的受力特征可以反映其自身健康状况, 通过采集正常人不同运动模式下的足底受力数据, 建立数据库, 可用于对比和识别人体的健康状况^[5-6]。

现阶段有关足底压力的研究多集中于走、跑运动^[7-8], 而鲜见对不同运动模式下的足部受力特征进行综合探讨的研究。本研究通过对比不同运动模式(慢走、正常行走、奔跑、双脚跳跃、单脚跳跃)下足底的各项压力数据(包括垂直压力、足底压强峰值、足底压力分布区域以及压力中心轨迹等), 探讨不同运动模式对健康人群足部受力的影响, 分析正常人运动时足底压力特征, 以为运动康复和步态识别提供参考。

资料与方法

一、一般资料

选取上海理工大学健康男性学生 10 例作为受试者, 平均年龄(22.00±2.25)岁, 平均身高(172.54±3.1)cm, 平均体重

(65.8±9.5)kg, 脚码(欧码)41~42 码。所有受试者均为自愿参加, 并签订知情同意书。

二、试验环境和设备

运动试验在实验室内完成(奔跑运动除外), 实验环境为 6m×10m 实验室, 室中步道长度满足测试要求。奔跑运动在走廊中进行, 地面材质与实验室相同, 坚硬且平坦。

试验装置为 F-scan 型鞋内足底压力分析系统(美国 Tekscan 公司), 所有受试者均用同一类型测试鞋垫, 其大小可裁剪, 鞋垫厚度为 0.15 mm, 每 1 cm² 覆盖 4 个压阻式传感器, 传感器测量范围为 0 kPa~862 kPa。

三、研究方法

试验时为避免鞋底材料的干扰, 所有受试者均裸足进行测试, 将测试鞋垫用双面胶粘贴于受试者足底, 使其在运动过程中鞋垫与足底的位置不会发生相对位移, 保证测压力点的一致性。完成对试验装置 F-scan 鞋内足底压力分析系统的调试。

将受试者的基本信息(姓名、年龄、体重等)录入 F-scan 型鞋内足底压力分析系统, 并采用系统的步态校准功能进行测试前的校准后, 要求受试者完成慢走、正常步行、跑、双脚跳跃、单脚跳跃运动, 利用节拍器使运动时的步态频率保持一致, 每人每种运动方式均测试 3 次。

受试者按要求完成如下运动: 慢走, 以 45 步/min 的频率行

走 10 m; 正常行走, 以 70 步/min 频率行走 10 m; 奔跑, 以 200 步/min 频率奔跑 20 m; 双腿跳跃, 以固定间距 140 cm 立定跳远动作前进, 一组跳跃 5 次, 单腿跳跃运动为左脚始终抬起; 单脚跳跃, 采取右腿跳跃的运动方式, 以固定间距 100 cm 跳跃前进, 一组跳跃 5 次。奔跑、正常行走、慢走在运动过程中多为单脚受力, 单脚跳跃整个过程中均为单脚受力, 双脚跳跃则是双脚受力。Menz 等^[9]在 2004 年指出, 在进行生物力学研究时, 处理双足数据会增加不必要的差异性, 所以本研究均使用受试者的右足数据作为研究对象。

四、采集指标和采集方法

收集所有受试者不同运动模式下的完整运动周期和触地期、足底压力分布区域、垂直地面反作用力与其峰值出现时间、足底压强峰值和压力中心轨迹。

1. 完整运动周期和触地期: 从 F-scan 型鞋内足底压力分析系统获得各时刻右脚足底压力数据, 根据试验数据进行运动周期的划分。将右足前一次触地时刻到后一次触地时刻间的时长记为一个完整运动周期 (单位为 s), 其中触地时刻为右脚从腾空转为落地的瞬间, 即右脚足底压力从无到有的瞬间; 触地期为完整运动周期内右脚足底压力不为 0 kPa 的时长 (即右脚落地时长) (单位为 s), 由于单脚跳跃和双脚跳跃不限速率, 故仅分析触地期。本研究为便于比较不同运动模式下的足底受力特征, 在分析足底压力分布区域、垂直地面反作用力、其峰值出现时间、足底压强峰值和压力中心轨迹时, 将不同运动模式下的触地期进行归一化处理, 以 0% 为触地期开始时刻, 100% 为触地期结束时刻。

2. 足底压力分布区域: 在不同运动模式下足底压力在足底的分布情况, 通过 F-scan 型鞋内足底压力分析系统可直接得到各时刻足底压力分布区域图。

3. 垂直地面反作用力与其峰值出现时间: 垂直地面反作用力是运动过程中地面对于人体的反作用力在垂直方向上的分力, 可以由 F-scan 型鞋内足底压力分析系统得到。为了消除受试者因体重不同而产生对垂直地面反作用力的影响, 本文对体重进行标准化处理, 以指标 α 表征垂直地面反作用力, $\alpha = \frac{\text{垂直地面反作用力}}{\text{体重} \times 9.8 \text{ N/kg}}$, 表示垂直地面反作用力是人体重力的 α 倍, 在一个触地期内 α 最大值出现的时刻即为垂直地面反作用力峰值出现时间。

4. 足底压强峰值和压力中心轨迹: 将触地期某时刻各区域足底压强的最大值称为该时刻的足底压强峰值 (单位为 kPa), 可以由 F-scan 型鞋内足底压力分析系统得到; 压力中心轨迹 (COP 轨迹) 是指受试者在触地期足底压力中心变化曲线, 各时刻压力中心可以由 F-scan 型鞋内足底压力分析系统得到。

五、数据处理

采用 Python 和 Excel 2010 版数据分析软件处理本研究所得数据, 所得数据用 ($\bar{x} \pm s$) 表示。采用重复测量方差分析方法,

对不同运动方式下各指标之间是否存在差异性进行验证, 使用 t 检验确定两两差异, 显著性水平 $\alpha = 0.05$ 。

结 果

一、不同运动模式下的完整运动周期和触地期

比较不同运动模式下完整运动周期和触地期发现, 受试者在奔跑时存在双脚同时离地的情形 (表 1)。慢走、正常行走、奔跑时, 随着速率的增加, 完整运动周期和触地期均减小。其中奔跑时触地期约占完整运动周期的 37%, 正常行走和慢走时, 触地期约占完整运动周期的 50%。

二、不同运动模式下的足底压力分布区域

图 1a 可见不同运动模式下的足底受力分布, 即慢走、正常行走、奔跑时足底压力分布区域在运动周期中的差别不大 ($P > 0.05$)。慢走、正常行走、奔跑时, 足底压力分布均为足跟最先受力, 后经足底中部区域向前脚掌转移, 前脚掌触地期达 75% 和以上时, 受力的主要部位为跖骨 (其中奔跑时, 第一、二跖骨受力最为突出, 而正常行走和慢走时第一跖骨受力最为突出)。单脚跳跃时由前脚掌第四、五跖骨最先接触地面, 后逐步全脚掌受力, 再经过第四、五跖骨, 最后整个前脚掌跖骨共同受力; 双腿跳跃则先由足跟受力, 然后按前脚掌各个跖骨、足跟、前脚掌的顺序转移。

三、不同运动模式下的垂直地面反作用力和压力峰值出现时间

图 1b 可见经体重标准化后, 垂直地面反作用力在触地期内的变化。奔跑运动时, 足底所受垂直地面反作用力的差异最为显著 ($P < 0.01$), 其值几乎达到人体重力的 6 倍, 压力峰值出现在触地期 40% 处; 正常行走和慢走时, 垂直地面反作用力波形变化相近, 仅在触地期 30% 处慢走有较明显的波谷, 其余阶段变化平稳, 在触地期 10% ~ 20% 处出现一小峰值, 最大值处于触地期 80% ~ 90%, 约为体重的 1.6 倍; 单脚跳跃和双脚跳跃时, 垂直地面反作用力波形均有一定的起伏, 呈现出“M”型双峰, 单脚跳跃时, 垂直地面反作用力达到体重的 4 倍, 双脚跳跃时, 垂直地面反作用力可达体重的 3.5 倍。

四、不同运动模式下的足底压强峰值

图 2 可见受试者在不同运动模式下足底压强峰值在触地期内的变化。在慢走、正常行走、奔跑时, 最大足底压强峰值均出现在触地期 70% ~ 80%; 在触地期内, 单脚跳跃时的足底压强峰值的平均值相较于其它运动模式更大 ($P < 0.05$), 且在触地期 90% ~ 100% 处出现最大值, 约为 1600 kPa; 双脚跳跃时, 由于双脚同时受力, 与单脚跳跃相比, 其足底压强峰值较小, 在触地期 90% ~ 100% 处出现最大值, 约 1200 kPa。

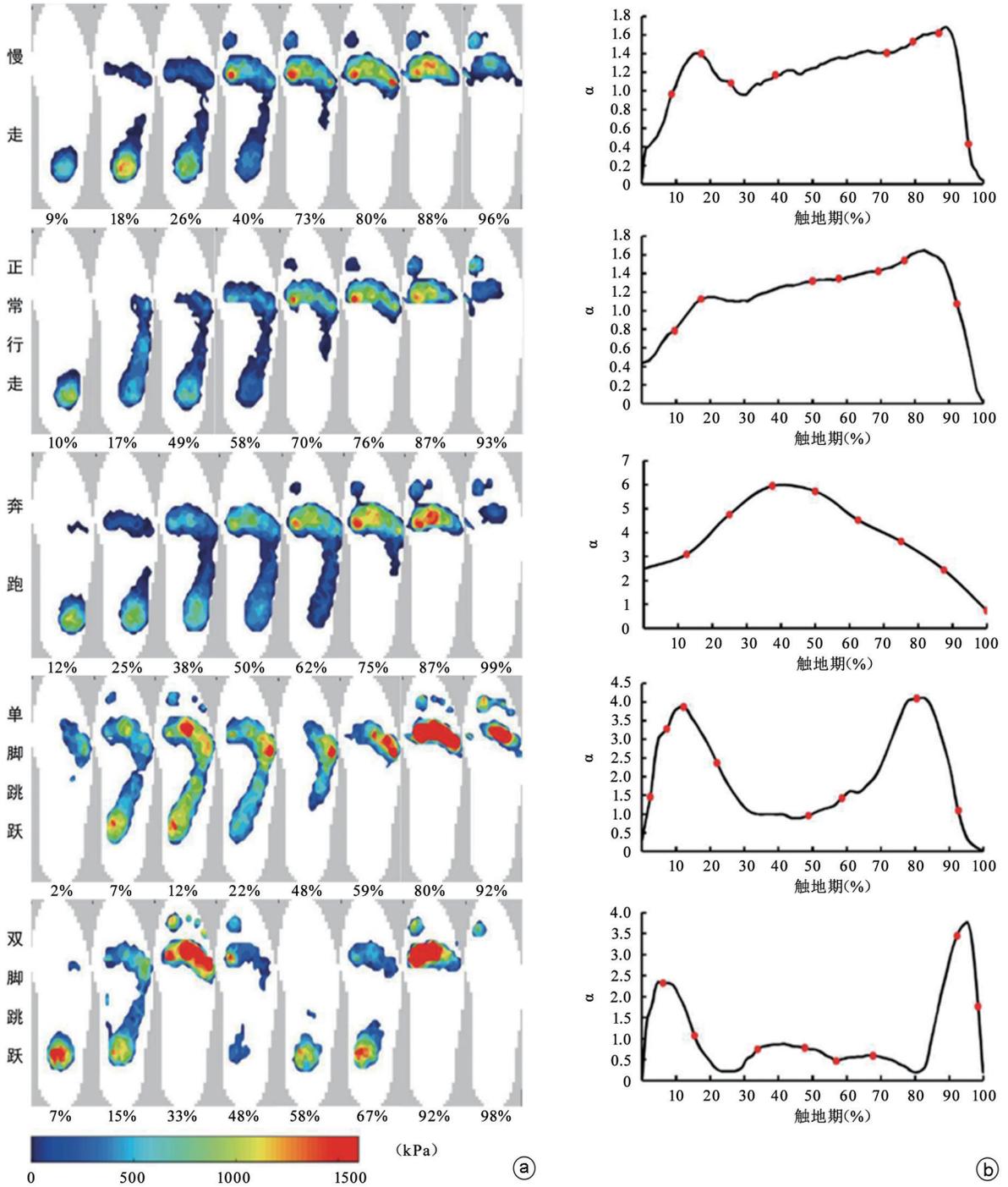
五、不同运动模式下的的压力中心轨迹

正常行走、慢走、奔跑时, 总体的压力中心轨迹变化均为由足跟到足趾偏移^[10-11], 其中正常行走和慢走变化曲线变化过程相近。值得注意的是, 在触地期前期, COP 轨迹从足跟侧向足

表 1 不同运动模式下的完整运动周期和触地期 ($s, \bar{x} \pm s, n = 10$)

项目	奔跑	正常行走	慢走	单脚跳跃	双脚跳跃
完整运动周期	0.60±0.07	1.71±0.05	2.81±0.15	-	-
触地期	0.22±0.02	0.89±0.88	1.43±0.11	1.15±0.10	1.25±0.14

注: 单脚跳跃和双脚跳跃的运动周期无意义, 未测量



注:a 为足底受力分布图,b 为垂直地面反作用力在触地期内的变化图(红色标记点为足底受力分布图对应的时刻)

图 1 不同运动模式下的足底压力综合图

趾侧缓慢偏移,后在触地期 20%~30%处迅速向足趾方向移动,在触地期 30%~90%为 COP 轨迹在此方向的稳定期,之后继续向脚趾移动直至触地期结束。另外,在正常行走时,COP 轨迹由外侧向内侧偏移;奔跑时,COP 轨迹变化较为平稳;慢走时,COP 轨迹变化较大。以上详见图 3。

正常行走、单脚跳跃、双脚跳跃时的压力中心轨迹变化,即双脚跳跃时,足趾到足跟方向中心变化剧烈,在触地期 20%~80%处,变化曲线为“M”型;单脚跳跃时,COP 轨迹变化较为平稳。双脚跳跃和单脚跳跃时,COP 轨迹的总体变化趋势为从足

外侧向足内侧变化,其中双脚跳跃时 COP 轨迹的变化剧烈,单脚跳跃时 COP 轨迹在触地期 10%~30%持续向内侧变化,之后小幅度波动,详见图 4。

讨 论

本研究分析了不同运动模式下的完整运动周期和触地期、足底压力分布区域、垂直地面反作用力、压力峰值出现时间、足底压强峰值和压力中心轨迹的特征。结果显示,走、跑类运动速率越快触地期越短,正常行走和慢走触地时间分别为奔跑

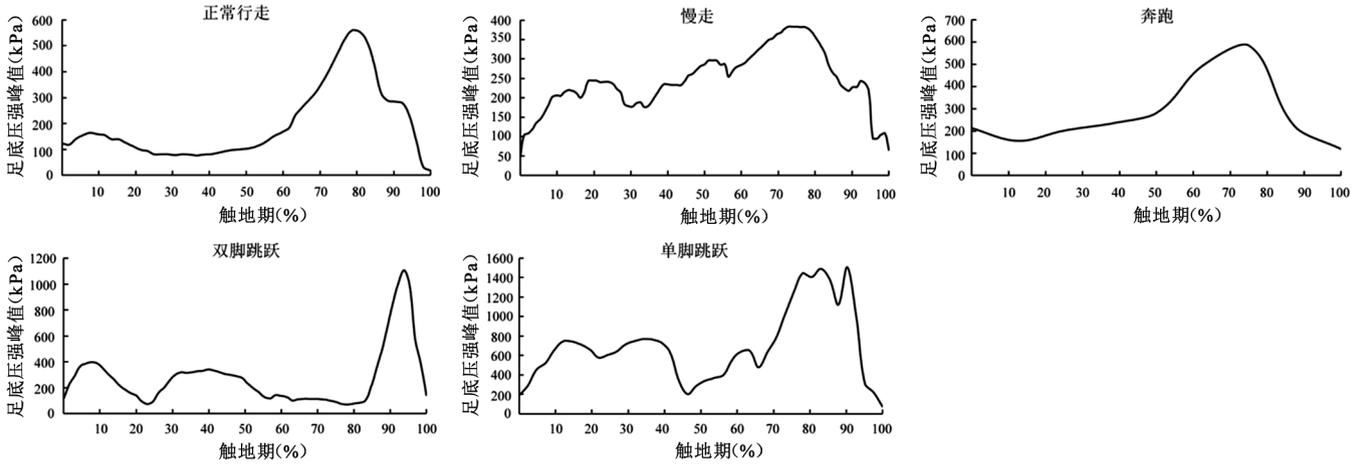
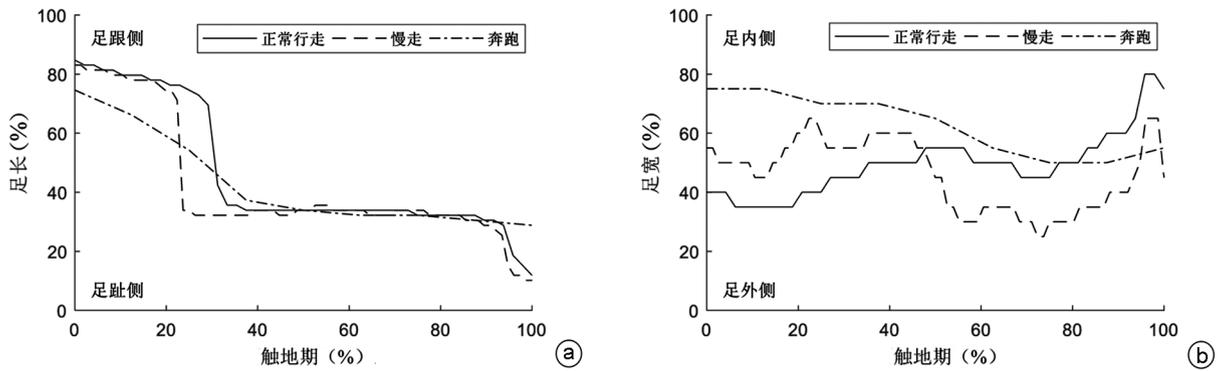
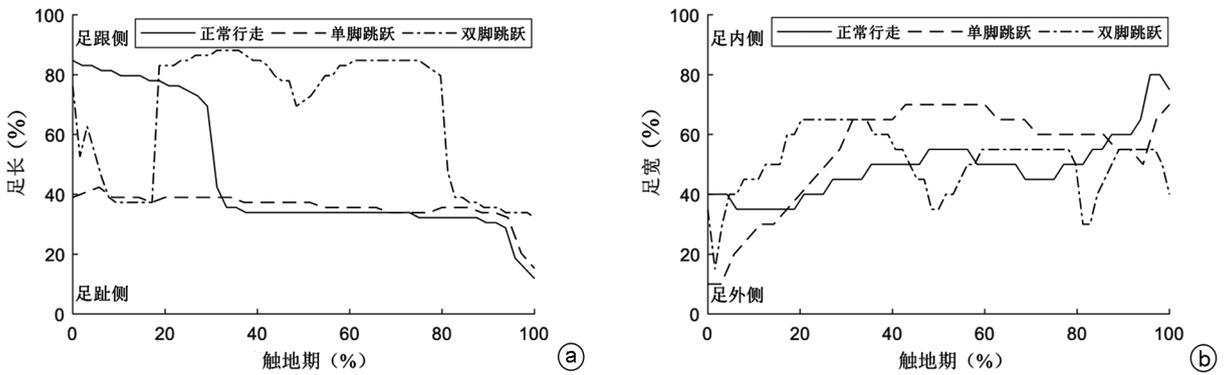


图 2 不同运动模式下的足底压强峰值在触地期内变化图



注:a 为足跟侧-足趾侧中心轨迹变化曲线,b 为足内侧-足外侧中心轨迹变化曲线

图 3 正常行走、慢走、奔跑时压力中心轨迹变化曲线



注:a 为足跟侧-足趾侧中心轨迹变化曲线,b 为足内侧-足外侧中心轨迹变化曲线

图 4 正常行走、单脚跳跃、双脚跳跃中心轨迹变化曲线

触地时间的 4 倍和 6.5 倍左右。

垂直地面反作用力在不同运动模式下的不同时间段上均存在很大差异,有研究表明,奔跑时,随着速度的加快,足部平均垂直地面反作用力也明显增强^[12]。正常行走和慢走时,在触地初期垂直地面反作用力大于自身体重,足跟最先受力,此时出现垂直地面反作用力第一次峰值,后经足底中部区域向前脚掌转移,全足受力时垂直地面反作用力最小,在前脚蹬地时足部主动发力,使垂直地面反作用力出现第二次峰值,足底峰值压强约在触地期 70%~80% 处出现最大值。奔跑时,虽然垂直

地面反作用力在大部分时间段内都较强,但足底的压强峰值在大部分时间段内均小于单脚跳跃,即在足部某些区域,单脚跳跃时受到的力要大于奔跑。足底压力中心可以反映健康或患病状态下对身体姿态的控制情况,是评价身体平衡和运动状态的重要指标^[13-14]。许多疾病患者双脚中心出现不对称或偏离正常人中心轨迹^[15]。本研究所得到的正常行走时的压力中心轨迹与 Feger 等^[16-17]的研究结果相近,即在触地期 10%~100%,中心轨迹具有向内侧移动的规律,如在走、跑时,压力中心轨迹始终前移,变化趋势为由足跟到足趾偏移,由外侧向内

侧偏移;双脚跳跃时,足底压力中心在前后、左右两个方向上的波动均较大,其主要原因是,跳跃冲击力较大,导致平衡性较差,触地前期足跟承受巨大压力。Pai 等^[18]曾指出,足底某一位若承受巨大压力,极易造成伤害,所以在双脚跳跃触地后,足底压力中心会迅速由外侧向内侧转移,从而产生一定的足旋进角^[19],减缓运动所带来的冲击力;当身体平衡后,足底压力中心再向前移动,前脚掌偏内侧发力,为下一次跳跃做准备。相比于双脚跳跃,单脚跳跃距离短,由跖骨最先触地,跳跃冲击力相对较小,足跟在整个过程中的受力明显小于双脚,但足底压力中心的内外侧波动同样可以反映单脚跳跃的平衡性较差。

研究表明,适度的运动有利于身体健康,但是超负荷或过量的运动则会引起身体损伤^[20-21]。走、跑、跳是人类日常生活中最常见的下肢运动,其受到的足底压力可以反映人体的健康状况。研究显示,通过改变运动的触地部位不仅可以预防疾病、减缓病痛^[20],还可提高运动速率^[21],进而提高运动成绩。该研究还指出,健康人群足底压力表现会出现一定差异,但良好的运动姿态可以使足部受力面积尽量最大化,分散运动所带来的冲击力,保护足部、踝关节和膝关节等^[21]。

综上所述,不同运动模式的足底受力特征既有相同点,也有不同点,其中相同点有:正常行走、慢走、奔跑时,足底压力分布区域的运动周期差别不大;单脚跳跃和双脚跳跃时,垂直地面反作用力波形均有一定的起伏,呈现出“M”型双峰;正常行走和慢走时,足跟侧至足趾侧的 COP 轨迹变化过程类似。不同点有:奔跑时,足底所受垂直地面反作用力的差异最为显著,足内侧至足外侧的 COP 轨迹变化较为平稳;双脚跳跃时,足跟侧-足趾侧 COP 轨迹变化剧烈,而单脚跳跃时,足底压强峰值的平均值最大,这些特征可为运动康复和步态识别提供参考。

参 考 文 献

- [1] Putti AB, Arnold GP, Abboud RJ. Foot pressure differences in men and women[J]. *Foot Ankle Surg*, 2010, 16(1):21-24. DOI: 10.1016/j.fas.2009.03.005.
- [2] Bertsch C, Unger H, Winkelmann W, et al. Evaluation of early walking patterns from plantar pressure distribution measurements. First year results of 42 children[J]. *Gait Posture*, 2004, 19(3):235-242. DOI: 10.1016/S0966-6362(03)00064-X.
- [3] Scott G, Menz HL. Age-related differences in foot structure and function[J]. *Gait Posture*, 2007, 26(1):68-75. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2006.07.009.
- [4] Putti AB, Arnold GP, Abboud RJ. Differences in foot pressures between Caucasians and Indians[J]. *Foot Ankle Surg*, 2010, 16(4):195-198. DOI: 10.1016/j.fas.2009.11.004.
- [5] Bennetts CJ, Owings TM, Erdemir A, et al. Clustering and classification of regional peak plantar pressures of diabetic feet[J]. *J Biomech*, 2013, 46(1):19-25. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2012.09.007.
- [6] 胡楠,毕胜,卢茜,等. 脑卒中偏瘫足内翻患者步行支撑期的足底压力特征[J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2015, 37(9):668-673. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2015.09.006.
- [7] 王增刚,王金之,冯茹,等. 负重对行军士兵下肢步态特征的影响[J]. *医用生物力学*, 2018(4):360-371. DOI: 10.16156/j.1004-

7220.2018.04.012.

- [8] Koldenhoven RM, Feger MA, Fraser JJ, et al. Variability in center of pressure position and muscle activation during walking with chronic ankle instability[J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2016, 48(5 Suppl 1):155-161. DOI: 10.1249/01.mss.0000487163.21392.37.
- [9] Menz HB. Two feet, or one person? Problems associated with statistical analysis of paired data in foot and ankle medicine[J]. *Foot*, 2004, 14(1):2-5. DOI: 10.1016/S0958-2592(03)00047-6.
- [10] De CA, Vanrenterghem J, Willems T, et al. The trajectory of the centre of pressure during barefoot running as a potential measure for foot function[J]. *Gait Posture*, 2008, 27(4):669-675. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2007.08.013.
- [11] 范文祥,倪朝民,刘孟,等. 年龄对正常人步行时足底压力中心轨迹的影响[J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2018, 40(3):174-178. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2018.03.003.
- [12] Gross TS, Bunch RP. Discrete normal plantar stress variations with running speed[J]. *J Biomech*, 1989, 22(6):699-703. DOI: 10.1016/0021-9290(89)90020-1.
- [13] Ekdahl C, Jarnlo GB, Andersson SI. Standing balance in healthy subjects. Evaluation of a quantitative test battery on a force platform[J]. *Scand J Rehabil Med*, 1989, 21(21):187-195. DOI: 10.1016/0891-4222(89)90045-0.
- [14] Winter DA. Human balance and posture control during standing and walking[J]. *Gait Posture*, 1995, 3(4):193-214. DOI: 10.1016/0966-6362(96)82849-9.
- [15] Chisholm AE, Perry SD, Mcilroy WE. Inter-limb centre of pressure symmetry during gait among stroke survivors[J]. *Gait Posture*, 2011, 33(2):238-243. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2010.11.012.
- [16] Mettler A, Chinn L, Saliba SA, et al. Balance Training and Center-of-Pressure Location in Participants With Chronic Ankle Instability[J]. *J Athl Train*, 2015, 50(4):343-349. DOI: 10.4085/1062-6050-49.3.94.
- [17] Feger MA, Hertel J. Surface electromyography and plantar pressure changes with novel gait training device in participants with chronic ankle instability[J]. *Clin Biomech*, 2016, 37:117-124. DOI: 10.1016/j.clinbiomech.2016.07.002.
- [18] Pai YC, Maki BE, Iqbal K, et al. Thresholds for step initiation induced by support-surface translation: a dynamic center-of-mass model provides much better prediction than a static model[J]. *J Biomech*, 2000, 33(3):387-392. DOI: 10.1016/S0021-9290(99)00199-2.
- [19] 朱瑶佳,霍洪峰. 走与跑运动模式下的足底压力中心轨迹特征[J]. *中国组织工程研究*, 2018, 22(3):4987-4992. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4344.0375.
- [20] Ryan M, Fraser S, McDonald K, et al. Examining the degree of pain reduction using a multielement exercise model with a conventional training shoe versus an ultraflexible training shoe for treating plantar fasciitis[J]. *Phys Sportsmed*, 2009, 37(4):68. DOI: 10.3810/psm.2009.12.1744.
- [21] 马云茹. 不同着地方式对跑步时下肢生物力学特征的影响[D]. 北京体育大学, 2016.

(修回日期:2021-10-12)

(本文编辑:阮仕衡)